

УДК 621.52

## Измеритель зазоров цилиндрово-поршневой пары, работающей в условиях газодинамического подвеса

А. В. Самвелов, С. Н. Теймурлы, Д. А. Широков, А. Т. Хан

*Характерные величины зазоров в газодинамических уплотнениях составляют порядка 10—20 мкм, поэтому задача прецизионного контроля величин зазоров и подбора сопрягаемых пар требует, как правило, дорогостоящего измерительного оборудования. Обоснована последовательность калибровки установки, проведения измерений и представлены результаты измерений зазоров цилиндрово-поршневой пары, работающей в условиях газодинамического подвеса, методом измерения расхода проходящего через зазор газа, разработанным специально для проведения технологического контроля поршней (плунжеров, вытеснителей) изготавливаемых машин.*

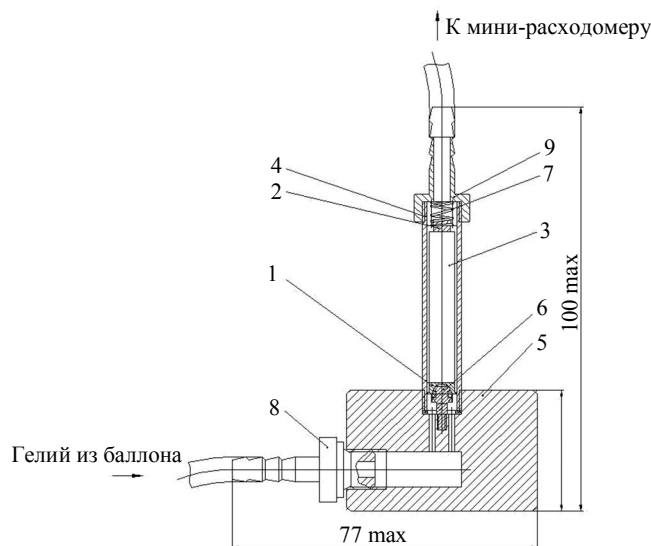
PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* измеритель, зазор, измерение, калибровка, поршень, цилиндр.

### Введение

Во многих отраслях промышленности и научных исследованиях широко применяются цилиндрово-поршневые машины (компрессоры, насосы, детандеры) с газодинамическим подвесом поршней [1]. Газовый зазор используется в парах трения для снижения коэффициента трения, уменьшения тепла, выделяемого при трении, и, как следствие, износа сопрягаемых узлов.

Газодинамический измеритель специально разработан для прецизионного измерения величины зазора газодинамического уплотнения вытеснителя микрокриогенной системы (МКС). Газодинамический измеритель, представленный на рисунке, состоит из чашки для установки на ней проверяемого вытеснителя, заглушки для предотвращения прохода регистрирующего газа через полость вытеснителя, гильзы, имитирующей внутреннюю поверхность колодца держателя фотоприемного устройства, корпуса, предназначенного для размещения на нем всех элементов сборки, шарнира и пружины, служащих для имитации свободного подвеса вытеснителя в процессе измерений, штуцеров, прямого и обратного потоков, соответственно.



**Газодинамический измеритель:**

1 — чашка; 2 — заглушка; 3 — вытеснитель; 4 — гильза;  
5 — корпус; 6 — шарнир; 7 — пружина; 8 и 9 — штуцера  
прямого и обратного потоков, соответственно

### Цель исследований

Отработка процесса измерения газодинамического зазора в изготовленной паре трения гильза—вытеснитель МКС.

Принцип работы при проведении измерений на газодинамическом измерителе состоит в следующем. Проверяемая деталь, вытеснитель МКС, устанавливается внутри гильзы измерителя. Измеряется расход газа через зазор между вытеснителем и гильзой измерителя. Элементы фиксации вытеснителя разработаны таким образом, чтобы воспроизвести принцип подвеса вытеснителя в МКС для приближения к реальным условиям.

Самвелов Андрей Витальевич, начальник НТЦ-МКС.

Теймурлы Сергей Николаевич, инженер 1-й категории.

Широков Денис Анатольевич, инженер-конструктор 1-й категории.

Хан Александр Трофимович, инженер.

ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.

Тел. (495) 529-97-50. E-mail: teimurly-sergey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2010 г.

### Методика исследований

Через впускной штуцер в полость измерителя поступает газообразный гелий из баллона с небольшим избыточным давлением для задания небольших расходов газа, проходящего через расходомер, так как он имеет небольшие предельные значения по измерению и большую при этом чувствительность для максимальной точности измерений. Давление регистрируется манометром редуктора заправочного устройства МКС. Выпускной штуцер через гибкий шланг связан с расходомером 1798X12CR34M (MKS Instruments).

При установившемся ламинарном течении гелия в кольцевом зазоре между гильзой измерителя и вытеснителем перепад давления  $\Delta p$ , обусловленный силами трения, согласно формуле Дарси—Вейсбаха [2], равен:

$$\Delta p = (\xi \rho v^2 l) / (2d_{\text{эKB}}),$$

где  $\xi$  — коэффициент сопротивления силам трения;

$\rho$  — плотность газа;

$v$  — средняя скорость движения газа в зазоре;

$l$  — длина канала;

$d_{\text{эKB}}$  — эквивалентный диаметр канала.

В условиях ламинарного течения  $\xi = 64/Re$  ( $Re$  — число Рейнольдса,  $Re = (vd_{\text{эKB}})/\nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость газа).

После подстановки  $\xi$  формула принимает окончательный вид:

$$\Delta p = [(64\nu) / d_{\text{эKB}}] [(\rho v^2 l) / (2d_{\text{эKB}})].$$

Так как эксперимент проводится при постоянной температуре (кинематическая вязкость и плотность неизменны) и неизменной длине канала, то после преобразования перепад давления, обусловленный силами трения, будет прямо пропорционален средней скорости газа в зазоре и обратно пропорционален квадрату эквивалентного диаметра, т. е.  $\Delta p \sim v / d_{\text{эKB}}^2$ . Таким образом, при неизменном перепаде давления скорость газа пропорциональна квадрату эквивалентного диаметра. Объемный расход газа, регистрируемый расходомером, равен  $G = v S$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения канала ( $S \sim d_{\text{эKB}}^2$ ). Следовательно, даже при незначительном изменении зазора между гильзой измерителя и контролируемым вытеснителем, а значит, и эквивалентного диаметра, достаточно ощутимо (пропорционально четвертой степени) меняется расход газа, проходящего через измеритель.

По эталонному вытеснителю проводится калибровка измерителя по величине расхода гелия, регистрируемого на вторичном приборе — цифро-

вом вольтметре MXD-4660A. Последовательность этой процедуры следующая.

Съемный выпускной штуцер отсоединяется от гильзы измерителя. Эталонный вытеснитель помещается в полость гильзы и фиксируется штуцером. Впускной штуцер присоединяется к баллону с газообразным азотом через редуктор. Далее посредством гибкого шланга расходомер подключается к выпускному штуцеру установки. Затем организуется подача давления гелия из баллона в установку. Газообразный гелий, проходя по каналам корпуса установки, попадает в контролируемый зазор между гильзой установки и помещенным в ее полость эталонным вытеснителем МКС. Давление гелия в зазоре имеет достаточное значение, чтобы был организован равномерный кольцевой газовый зазор между вытеснителем и гильзой измерителя. Таким образом, реализуется газодинамический подвес вытеснителя, аналогичный по условиям реальной МКС. На выходе из установки газ попадает в расходомер.

Принцип работы расходомера состоит в следующем. Нагревательные обмотки расположены на сенсорной трубке, по которой движется газ. Напряжение, необходимое для поддержания постоянной температуры профиля в этой трубке, пропорционально расходу газа через эту трубку. Каждая обмотка включена в плечи моста, дисбаланс которого при наличии расхода газа компенсируется поступлением в него количества энергии, прямо пропорционального по величине массовому расходу газа.

Преимущество данного расходомера: высокая динамика, время отклика сенсора на изменение расхода — менее 500 мс; снимаемое с сенсора напряжение прямо пропорционально расходу, что не требует линеаризации расхода; минимальное влияние изменения температуры окружающей среды на сенсор, так как вся трубка находится в камере, где поддерживается постоянная температура.

Полученное значение массового расхода гелия, выраженное в вольтах, является критерием при последующих проверках вновь изготовленных вытеснителей МКС.

### Результаты исследований

Исследования проводились на эталонном образце вытеснителя и пяти изготовленных образцах. В процессе проведения исследований получены следующие результаты. После установки и проверки эталонного вытеснителя было получено значение массового расхода, выраженное в единицах напряжения, равного 1,407 В, определяемое по мультиметру MXD-4660A. Перепад давления определялся по манометру редуктора и составлял

1,3—1,5 атм. Далее эталонный образец вытеснителя заменялся проверяемыми образцами. В результате испытаний образцов были получены соответствующие значения расхода.

Проверяемый образец вытеснителя	Напряжение, подаваемое на мост расходомера, соответствующее массовому расходу, В
Эталонный образец	1,407
Образцы:	
№ 1	1,991
№ 2	3,021
№ 3	0,325
№ 4	1,550
№ 5	2,520

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что образец № 4 близок по результатам значения расхода к эталонному. Далее, проверив его окончательно, установив в собранный образец МКС и измерив параметры системы, можно делать окончательные выводы о его использовании.

## Заключение

Описываемый метод может быть применим в условиях массовой сборки охладителей микрокриогенных систем. Метод весьма простой, технологичный, эргономически удобный, достаточно точный и универсальный, так как позволяет проводить проверки подобных механических пар различных устройств машин и механизмов. Метод является альтернативой методу с использованием дорогостоящих инструментальных микроскопов, а также применению ряда калибров, с использованием которых сложно отобрать пары с зазором 10—20 мкм.

## Л и т е р а т у р а

1. Болитянский А. П. // Криогенное и холодильное оборудование и технологии. 1997. Вып. 1. Ч. 2. С. 104.
2. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. — М.: Энергоиздат, 1982.

## Measuring instrument of a piston-cylinder pair clearance working in the gas dynamic suspension

A. V. Samvelov, S. N. Teymurly, D. A. Shirokov, A. T. Khan  
Orion R&P Association, 46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: teimurly-sergey@mail.ru

*At present piston-cylinder machines (compressors, pumps, gas-expansion machines) with a gas-dynamic suspension of the pistons are quite widely applied in a lot of branches of industry and in scientific research. The gas clearance is used in friction pairs to reduce a friction ratio, decrease a quantity of heat separated while there's friction with a sequence of wearing out of junctions. The present article describes a calibration succession of the gas clearance in the piston-cylinder pair, of measurement and presents the results of the clearance measurement of the piston-cylinder pair working in the gas dynamic suspension conditions. These conditions were worked out particularly for the in-process measurement of the machine pistons (plunges, displacers).*

PACS: 85.60.Gz

*Keywords:* instrument, clearance, measurement, calibration, piston, cylinder.

Bibliography — 2 references.

Received January 20, 2010